

об'єктах, а й здійснюється синтез змісту пізнання в логічні форми: поняття, судження, умовиводи.

В історії філософії постійно ведуться суперечки про пріоритетність певного рівня пізнання – або чуттєвого, або раціонального, що привело до створення двох протилежних напрямків – емпіризму (сенсуалізму) та раціоналізму. Прихильники емпіризму (Бекон, Гоббс) визнають чуттєве сприйняття головним і єдиним джерелом наших знань; абстрактному мисленню відводиться роль систематизатора та впорядника чуттєвих даних. Раціоналісти, справедливо ставлячи питання, а звідки ж беруться правила, по яким проводиться ця систематизація, приходять до висновку про пріоритетність раціонального пізнання, а чуттєве пізнання в них (це Декарт, Спіноза, Гегель та ін.) зводиться лише до механізму зв'язку розуму з матеріальним світом (поскільки воно мінливе, минуле та поверхнєве). Істина полягає в тому, що чуттєве та раціональне пізнання — це діалектично взаємозв'язані сторони єдиного пізнавального процесу, які лише в єдності можуть давати адекватну картину світу. Кожний момент чуттєвого відображення в пізнанні опосередкований мисленням. У свою чергу, раціональне пізнання одержує свій зміст з чуттєвих даних, які забезпечують постійний зв'язок мислення з конкретними предметами та явищами дійсності.

Список літератури

2. Шевченко В.І. Концепція пізнання в українській філософії. – К.: 1993. – 168 с.

Одержано 20.10.09

В.Ф Мануйлов, доц.

Кіровоградський національний технічний університет

Перенапруги в мережах 6(10) – 35 кВ при комутаціях вимикачами. Процеси в дугастих системах і електричних мережах 6(10) – 35 кВ при комутаціях вимикачами

1 Причини виникнення перенапружень в мережах 6(10) - 35 кВ

Спробуємо розібратися в причинах перенапружень. Почнемо з простого твердження, очевидного для будь-якої людини, знайомого з курсом ТОЕ: будь-яка комутація (включення або відключення) якого-небудь елементу мережі (трансформатора, електродвигуна, конденсаторної батареї, повітряній або кабельній лінії і так далі) викликає перехідний процес. Це пов'язано з тим, що мережа є сукупністю індуктивностей і ємкостей основного електротехнічного устаткування, тому підключення або відключення деякого елементу веде до встановлення нового режиму. Перехід мережі від режиму до комутації до режиму після комутації супроводжується змінами струмів в елементах і напруги на них. Як правило, цей перехід має вид затухаючих коливань, в процесі яких напруга на ємкостях устаткування щодо землі або між фазами може досягати величин значно більших, ніж номінальне. Це і називається перенапруженнями.

Подібний процес об'єктивний і не залежить від типу використовуваного вимикача. Наприклад, можна показати, що при включенні (пуску) високовольтного електродвигуна можливе виникнення перенапружень з кратністю до 3,3 відносних одиниць (в.о.) по відношенню до амплітуди найбільшої робочої напруги, що представляє небезпеку для його ізоляції. Перенапруження в цьому випадку не залежать від типу дугогасного середовища і визначаються тільки моментом включення і розкидом замикання контактів різних фаз. Виключити ці перенапруження регулюванням ходу контактів вимикача не представляється можливим. При відключенні вимикачем будь-якого типу (маломасляним, вакуумним, елегазовим, електромагнітним) практично кожного подвійного або двофазного замикання на землю в мережі 6-10 кВ з ізолюваною або заземленою через дугогасний реактор нейтраллю на всі приєднання, включені на дану секцію, впливають перенапруження з кратністю до 3,4 в.о. Причиною їх є неодноразове відключення струму в пошкоджених фазах, коли на першій фазі, що відключилася, напруга відновлюється від нуля до амплітуди лінійного. При цьому в процесі коливань напруга досягає величини подвійного лінійного. Саме ці перенапруження можуть викликати багатомісні пошкодження ізоляції (і такі випадки відомі в експлуатації), коли з ладу виходять відразу декілька високовольтних електродвигунів або кабелів. І справа тут не в типі дугогасного середовища, використовуваного у вимикачі, а в об'єктивно існуючих явищах. Тепер розглянемо проблему перенапружень при використанні вакуумних і елегазових вимикачів з урахуванням особливостей дугогасного середовища і конструкцій цих апаратів, а також навантажень, ними комутуваних. При включеннях навантаження (трансформатора, електродвигуна, конденсаторної батареї) правильно спроектованим вимикачем (що не дає відскоків контактів) його дугогасне середовище з погляду виникнення перенапружень не грає ніякої ролі. Перенапруження в цьому випадку обумовлені особливостями мережі і комутуваного приєднання як індуктивно-ємкісних схем, моментом включення за часом і розкидом в замиканні контактів різних фаз вимикача (див. вище). Основними причинами перенапружень на ізоляції окремого приєднання (і лише його, а не всій мережі) при відключенні навантаження, пов'язаними з особливостями дугогасного середовища і конструкцією вимикача, є зріз струму і ескалація напруги. Розглянемо ці явища по порядку.

1.1 Зріз струму

Будь-який вимикач відключає струм при проходженні його через нуль (із зрушенням за часом в різних фазах), коли підведення енергії до дуги з боку мережі зменшується. У околонульової області струму можливий швидкий розпад каналу дуги і примусовий спад струму від деякого значення (як правило, одиниці - десятки ампер) до нуля за дуже малий час (значно раніше за природний нуль струму). Це явище називається зрізом струму. Виникає воно при відключенні малих індуктивних струмів (наприклад, струмів холостого ходу трансформаторів і електродвигунів), несталіх струмів включення трансформаторів, пускових струмів електродвигунів, струмів шунтуючих реакторів.

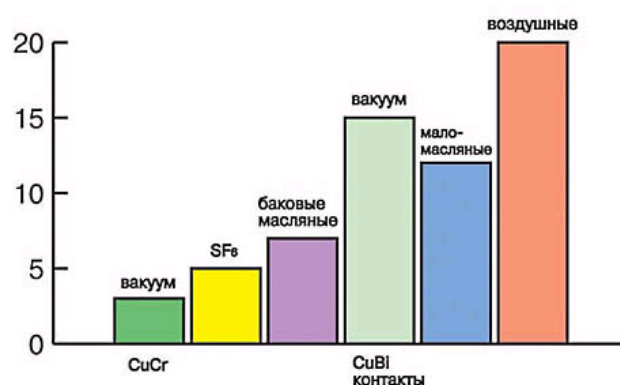


Рисунок 1 - Відносні струми зрізу вимикачів з різними дугогасними середовищами

Зріз струму характерний для вимикачів будь-якого типу, що застосовується в даний час (маломасляних, електромагнітних, повітряних, вакуумних, елегазових). Причиною зрізу струму у вимикачах з гасінням дуги в газовому середовищі є інтенсивне дуття і розвиток високочастотних коливань на спадаючій ділянці синусоїди струму, що відключається. Дуття викликає значне охолодження плазми в дуговому проміжку і швидке зменшення її провідності. Високочастотні коливання, що розвиваються в контурі: ємкість на шинах - нелінійний опір дуги - індуктивність і ємкість приєднання, накладаються на струм 50 Гц і приводять до того, що сумарний струм в дуговому проміжку переходить через нуль і відбувається гасіння із зрізом. У вакуумних вимикачах причиною зрізу струму є нестійкість дуги при малих струмах, оскільки вона горить в парах металу контактів.

При зрізі струму в індуктивності навантаження «закривається» енергія, яка потім звільняється на ємкість приєднання і може викликати перенапруження. Як відомо, кратність перенапружень при цьому визначається індуктивністю навантаження, ємкістю приєднання (в основному довжиною кабельної або повітряної лінії) і величиною струму зрізу. Останній параметр розрізняється для вимикачів з різними дугогасними середовищами. На мал.1. приведена діаграма відносних струмів зрізу для вимикачів різного типу.

Як видно з мал.1, вакуумні вимикачі з хром-мідними контактами мають найменший струм зрізу. Він складає 5-6 А за даними різних досліджень. Більшість виробників вакуумних вимикачів використовують для виготовлення контактів саме хром-мідні композиції. Елегазові вимикачі з гасінням дуги обертаням або автодуттям мають струм зрізу практично такий же, як і вакуумні вимикачі. Це пов'язано з тим, що інтенсивність дугогасіння у них залежить від величини протікаючого струму. У компресійних і комбінованих елегазових вимикачів з додатковим поршнем струми зрізу вищі, ніж у вакуумних вимикачів. В принципі струм зрізу елегазових вимикачів залежить від величини струму, що відключається, конструкції вимикача і ємкості приєднання і може значно перевищувати такий для вакуумних. Таким чином, з погляду величини струму зрізу і створюваних при цьому перенапружень елегазові вимикачі не мають ніяких переваг перед вакуумними.

Окрім величини струму, на перенапруження при зрізі, як вже указувалося вище, впливають індуктивність навантаження (або потужність) і ємкість приєднання (довжина повітряної або кабельної лінії). При значній довжині приєднання перенапружень із-за зрізу струму у вимикачі взагалі не виникає. Наявність навіть невеликого активного навантаження на вторинній стороні силового трансформатора, що відключається, також виключає виникнення перенапружень унаслідок зрізу. Використання таких сучасних захисних апаратів, як ОПН, взагалі знімає питання перенапружень незалежно від типу використовуваного вимикача. Слід зазначити, що в даний час в мережах експлуатуються тисячі маломасляних вимикачів із струмами зрізу значно більше, чим у вакуумних вимикачів. Тобто потенційно маломасляні вимикачі також здатні створювати перенапруження і причому вищі, ніж вакуумні.

1.2 Ескалація напруги

Розглянемо тепер другу причину перенапружень при відключеннях навантаження: ескалацію напруги. Це явище характерне тільки для вакуумних вимикачів. Проте воно виникає у край рідко, тільки при відключенні пускового струму що не встигли розвернутися або загальмованих електродвигунів (причому з 100 відключень пускових струмів тільки 5-10 можуть супроводжуватися ескалацією напруги). Фізична суть цього явища описана в. Перенапруження в цьому випадку можуть досягати 6-7-кратних. Осцилограма, що ілюструє подібний процес, приведена на мал.2.

Експериментальних даних по відключенню пускових струмів електродвигунів елегазовими вимикачами практично немає. Створюється враження, що фірмам -

виробникам елегазового устаткування невідомо про перенапруження в цьому випадку, або публікація таких даних їм не вигідна.

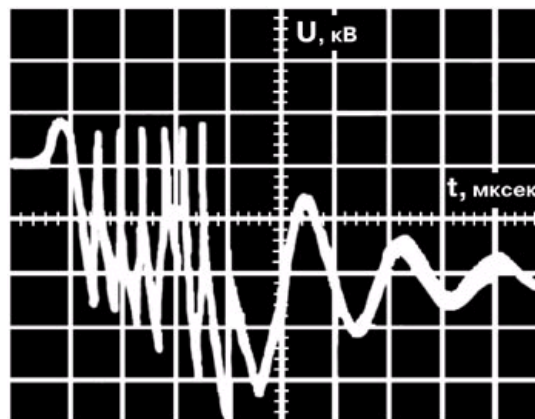


Рисунок 2 - Експериментальна осцилограма відключення пускового струму електродвигуна 6,3 кВ, 736 кВт, підключеного кабелем перетином 3х95, завдовжки 70 м, вакуумним вимикачем з виникненням ескалації напруги з кратністю 4,0 в.о. у першій фазі вимикача, що відключається

Виходячи з наявної інформації, можна припускати, що елегазові вимикачі не схильні до ескалації напруги. Проте їх підвищені в порівнянні з вакуумними вимикачами струми зрізу і можливість одноразових повторних запалень, ймовірно, можуть бути причиною перенапружень при відключеннях неодружених трансформаторів і пускових струмів електродвигунів (при малих довжинах кабелю).

Ще раз відзначимо, що розглянутий випадок відключення пускового струму - достатньо рідкісна подія, а в деяких випадках практично неможливе. Тому зіставлення елегазових і вакуумних вимикачів з погляду комутаційних перенапружень слід проводити виходячи з величини струму зрізу.

Таким чином, на підставі розгляду характерних причин виникнення перенапружень, пов'язаних з характером дугогасного середовища вимикача, можна стверджувати, що елегазові вимикачі в цьому відношенні не мають переваг в порівнянні з вакуумними.

Звідки ж все-таки виникло таке упередження, що тільки вакуумні вимикачі створюють перенапруги? Мабуть, витoki його слід шукати на зорі впровадження вакуумної комутаційної техніки. По-перше вакуумних вимикачах, встановлених в експлуатацію ще в СРСР на початку 80-х років, для виготовлення контактів використовувався вольфрам. Розробники вакуумних камер вважали, що застосування цього тугоплавкого металу дозволить понизити знос контактів. Проте вимикачі з вольфрамовими контактами були здатні створювати значні зрізи струму, порядку 20-30 А. Саме ця обставина, а також відсутність засобів захисту від перенапружень в мережах 6-10 кВ у той час привело до значного збитку в результаті пробойів ізоляції. Енергетика - галузь консервативна, і думка, що одного разу сформувалася, а особливо негативне, дуже складно змінити.

2 Процеси в дугогасних системах і в електричних мережах 6(10) - 35 кВ при комутаціях вимикачами

Дугогасні середовища (масло, елегаз, вакуум), використовувані в комутаційних апаратах, обумовлюють своєрідність процесів в дугогасних пристроях, що впливають на перенапруження. Розряд на контактах вимикача супроводжується концентрованим виділенням теплової енергії: на катоді виділяється енергія, що підводиться зарядженими іонами, і частина енергії електронів, що емітуються катодом унаслідок випромінювання з прикатодній області. До анода в основному підводиться енергія електронів. Певну роль в

тепловому балансі грають високотемпературні потоки плазми. Частина енергії поступає на електроди із стовбура дуги за рахунок теплопровідності, конвекції і випромінювання.

Вплив дугогасного середовища на характер протікання розряду вельми істотно, оскільки зумовлює такі основні характеристики дуги, як її діаметр, температуру, час горіння, викид потоків плазми і ін.

2.1 Масляні вимикачі

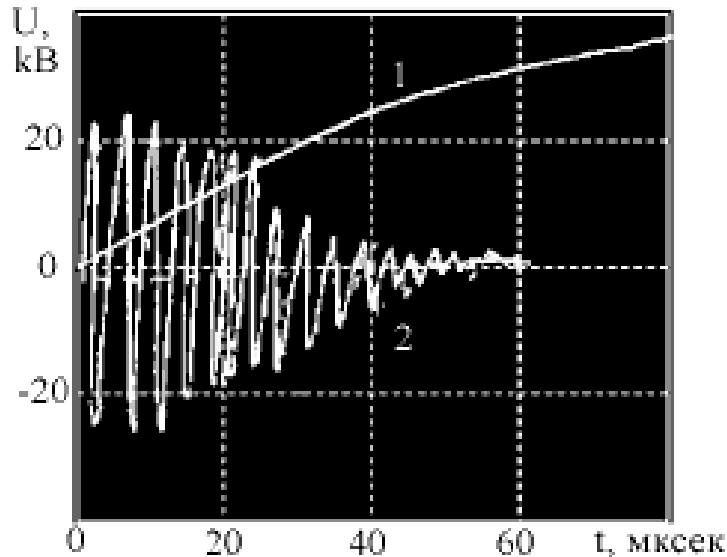


Рисунок 3 - Криві процесу відновлення ізоляційних властивостей в маслі

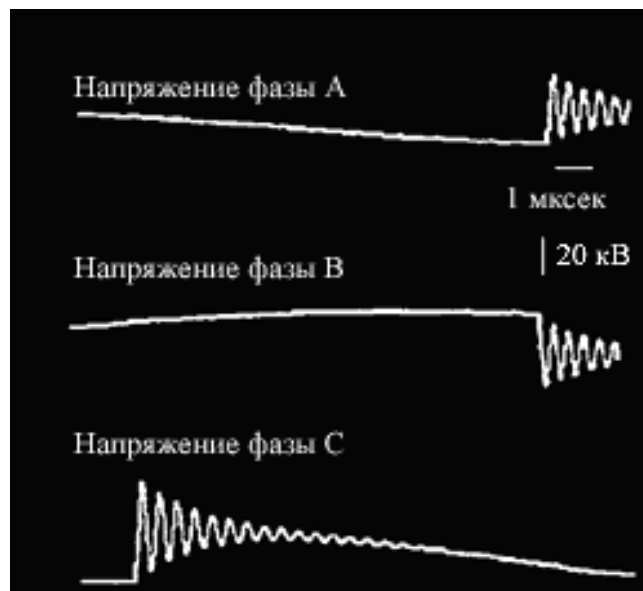


Рисунок 4 - Відключення електродвигуна масляним вимикачем

У масляних вимикачах розрив струму обумовлюється специфічними фізико-хімічними процесами, що відбуваються в зоні дугогасіння. При виникненні дуги між контактами, що розмикаються, утворюється парогазове середовище, що складається з продуктів розкладання масла (66% водороду, 17% ацетілену, 9% метану і ряд домішок). Висока тепловідвідна здатність водню забезпечує ефективне гасіння дуги. Проте в

процесі розкладання масла, окрім водню, утворюються вуглецеві з'єднання у вигляді твердого осаду, а також пари матеріалу контактів і продукти розкладання твердих ізоляційних елементів, що знижують ефективність дугогасіння.

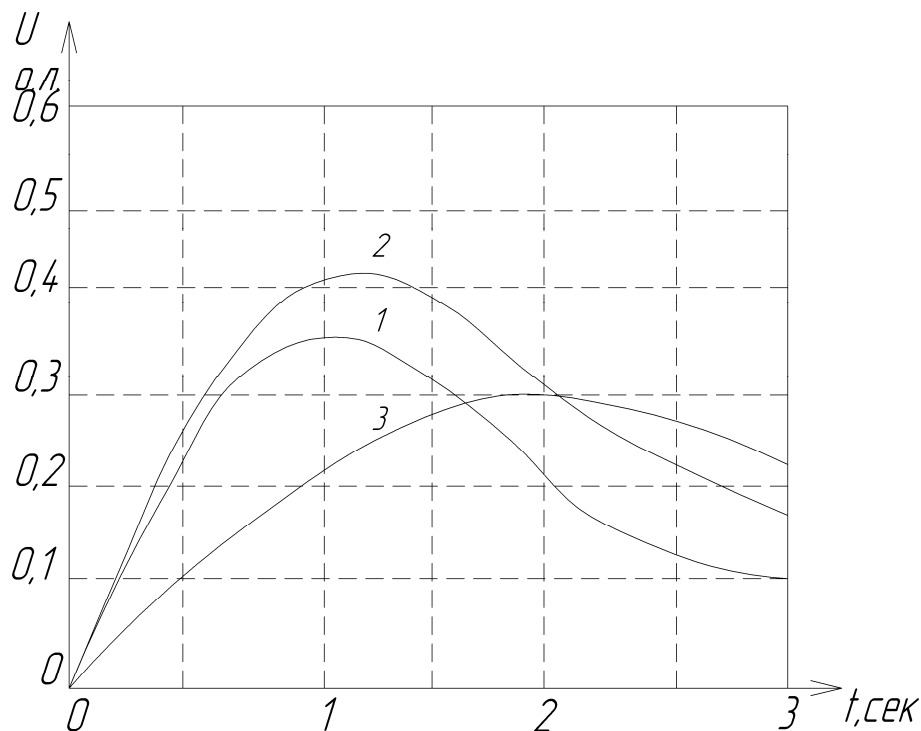


Рисунок 5 - Криві напруги в різних точках еквівалентної схеми двигуна при відключенні масляним вимикачем

Відновлення ізоляційних властивостей масляного середовища відбувається значно повільніше, ніж у вимикачах з іншими дугогасящими середовищами. Крива 1 на мал.3.3. показує графік зміни напруги пробою міжконтактного проміжку масляного вимикача після розбіжності контактів. Крива 2 демонструє характер зміни напруги на введеннях двигуна при розмиканні контактів після проходження струму через нуль. Ця крива показує, що високочастотний процес, пов'язаний з обміном енергією між ємкісними і індуктивними елементами приєднання, може привести до багатократних повторних пробойів міжконтактного проміжку. Проте на перших етапах дугового розряду за рахунок підживлення струмом від сусідніх фаздуговий розряд підтримується і у момент проходження струму через нуль. Причому дуговий розряд зберігається до 6-8 періодів частоти 50 Гц. Отже, до моменту, коли ізоляційні властивості вимикача будуть відновлені, запас енергії в ємкості і індуктивності приєднання буде погашений і вірогідність ескалації перенапруження за рахунок повторних пробойів дуже низка.

На мал.4. показані осцилограми напруги фаз А, В і З на введеннях електродвигуна потужністю 500 кВт, знайдених шляхом моделювання процесів. Кратність першого імпульсу перенапружень складає $2 \cdot 10^3$ кВ, що нижче за допустиму кратність. Мал.5. ілюструє розподіл напруги по витках обмотки в точках 1, 2 і 3 еквівалентної схеми двигуна (мал.6.), які знаходяться в межах допуску. Перенапруження при відключенні масляного вимикача сильно залежать від властивостей дугогасного середовища.

Кількість продуктів розкладання масла залежить від енергії дуги, числа комутацій і в середньому на одиницю енергії дуги складає 0,045 0,060 г/кДж. Так, після 10 відключень струму 5 ка вимикачем з контактами з композиції 70 W-Cu в дугогасному пристрої з об'ємом масла $3 \cdot 10^3 \text{ см}^3$ міститься 38 г вуглеців (у вигляді осаду), 2 г вольфраму і 0,8 г міді. Вуглецеві з'єднання до декількох місяців залишаються в маслі в зваженому стані, знижуючи електричну міцність внутрішньої ізоляції масляного вимикача. Після 8-10

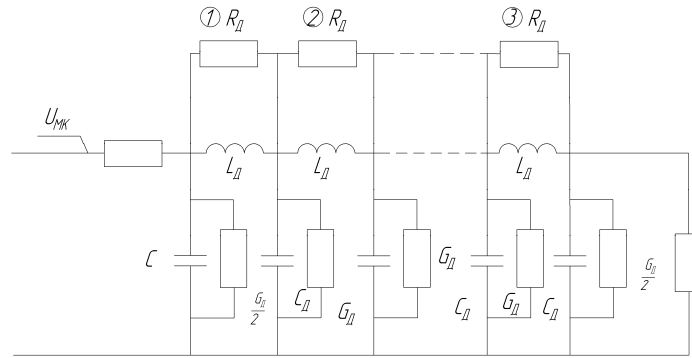


Рисунок 6 - Схема заміщення електродвигуна

відключень маломасляного вимикача на 6 кВ опір внутрішній ізоляції знижується до 30 МОм (при первинному значенні 10000 МОм). Наявність вільних частинок вуглецю в зваженому стані і особливо металу знижує електричну міцність масла, що погано позначається на процесах в дугогасній камері в режимі включення. При зменшенні відстані між контактами виникає передчасний множинний пробій міжконтактного проміжку, що провокує перенапруження.

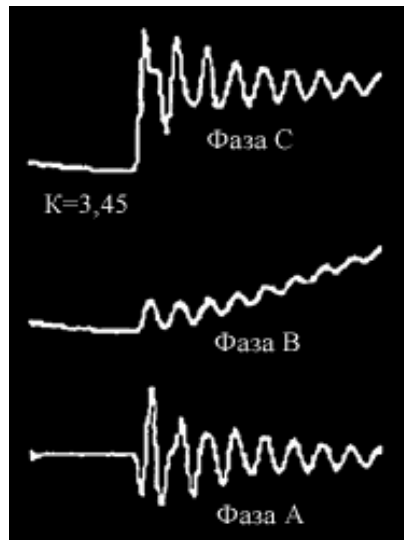


Рисунок 7 - Перенапруги при увімкненні електродвигуна масляним вимикачем

Моделювання процесів включення електродвигуна тієї ж потужності ілюструється мал.7 (масштаб малюнка той же, що і мал.4). Кратність перенапружень вище норми, а перенапруження на витках обмотки (мал.8) виявляються неприпустимими.

2.2 Елегазові вимикачі.

Характер дугогасіння в елегазових (SF₆) вимикачах істотно відрізняється від процесів в інших дугогасних середовищах. Так, енергія, що виділяється дугою в елегазах, менше, ніж в повітрі, унаслідок меншого її тепловмісту, обумовленого меншою напругою на дузі.

Чим нижче температура дисоціації газу, тим краще умови для зменшення залишковій провідності стовбура дуги, оскільки в цьому випадку відбувається інтенсивніше охолодження її високотемпературного ядра. Тому елегаз з температурою дисоціації 2000 До володіє високою дугогасною здатністю в порівнянні з повітрям, температура дисоціації якого рівна 7000 К. Відзначимо також електронегативні властивості елегазу, сприяючі активному захопленню вільних електронів і підвищенню ефективності гасіння дуги.

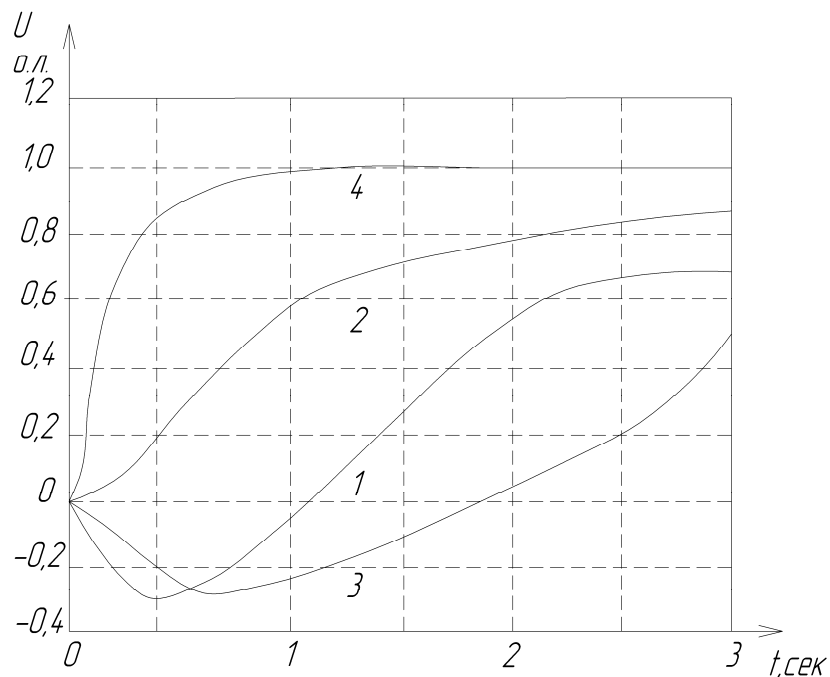


Рисунок 8 - Перенапруження на витках при включенні двигуна масляним вимикачем

Швидкісна зйомка дугових процесів надшвидкісним фотореєстратором СФР-2М, фотометричні і металографічні методи дослідження дугових процесів на електродах з різних матеріалів дозволили виявити істотну відмінність в характері протікання дугових процесів при магнітному дутті в елегазі і повітрі. Гасіння дуги здійснювалося за допомогою її обертання під впливом магнітного поля в проміжку між концентричними електродами 1 і 2 в елегазі (мал.9.).

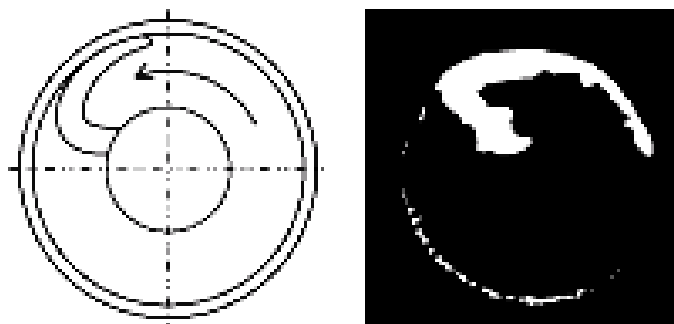


Рисунок 9 - Характер руху електричної дуги при магнітному дутті в елегазі

Швидкість руху при магнітному дутті в елегазі:

$$V_d = K_{dy} I^{0.83} B^{0.5} P^{0.66}, \quad (3.1)$$

де I - струм відключення, А;

B - магнітна індукція, Тл;

P - тиск SF₆ в дугогасній камері, Па .

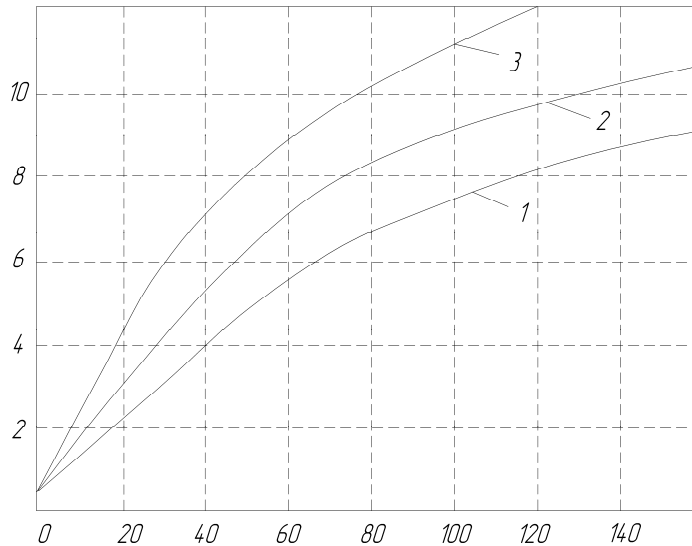


Рисунок 10 - Тимчасові залежності пробивної напруги елегазового вимикача

Аналіз результатів швидкісної зйомки показує, що в елегазі спостерігається чітко виражений (« відтшнурований ») стовбур дуги і відбувається звуження (стягання) її підстав. Дуга в елегазі має схильність до петлеутворенню (особливо в області переходу струму через нульове значення), а за певних умов відбувається розщеплювання стовбура дуги в елегазі на окремі волокна. У ряді випадків спостерігається викид потоків плазми, що утворюються в результаті радіального стиснення дуги її власним магнітним полем (за рахунок пінч ефекту), що приводить до закороченню окремих ділянок дуги, стрибкоподібному її переміщенню.

Найбільш сприятливі умови для підвищення ефективності гасіння дуги і дугостійкості контактів при магнітному дутті в елегазі відповідають рівномірному руху дуги (мал.9.), коли її підстави переміщуються приблизно з однаковою швидкістю (при цьому стовбур дуги декілька випереджає підстави). Це обумовлено зниженням локального нагріву контактів унаслідок розсіювання енергії, сконцентрованої в підставах дуги, при швидкому її переміщенні.

Фотометричні дослідження параметрів електричної дуги на моделях дугогасних пристроїв елегазових вимикачів дозволили визначити напругу на дузі, її діаметр і температуру дуги SF₆.

На підставі фотореєстрації дуги визначений діаметр стовбура дуги в різних системах дугогасних пристроїв елегазових вимикачів на моделях, приведено зіставлення розрахунків з експериментом, встановлений вплив матеріалу контактів на характер дугогасіння. Діаметр дуги в елегазі менший, ніж в повітрі. Внаслідок цього вище відношення одиниці поверхні дуги до її об'єму в елегазі обумовлює інтенсивніше відведення тепла, а отже, інтенсивніше відновлення електричної міцності міжконтактного проміжку.

Експерименти показують, що діаметр дуги в елегазі при відключенні струму 5 кА на контактах з міді складає 10 мм, температуру ядра дуги - $25 \cdot 10^3$ К, на периферії дуги - $10 \cdot 10^3$ К.

Істотно впливає на дугові процеси викид потоків плазми, що виникають на контактах унаслідок радіального стиснення дуги її власним магнітним полем. При цьому в дузі утворюється різниця тиску, що обумовлює викид потоків плазми, витікаючих з місць найбільшого звуження - підстав дуги.

Окрім стягуючого ефекту, що викликається електромагнітними зусиллями, певну роль в утворенні потоків плазми грають теплові процеси в приелектродних підставах дуги. Звуження підстав дуги приводить до збільшення щільності струму в них, а отже, і до збільшення температури, унаслідок чого згустки плазми з вищою температурою спрямовуються в область з меншою температурою і нижчим тиском. Крім того, підвищення температури в підставах дуги супроводжується інтенсивним випаровуванням матеріалу контактів і освітою за рахунок цього областей з підвищеним тиском. Сукупність цих явищ і обумовлює освіту і викид потоків плазми, що роблять істотний вплив на дугогасіння. Для виникнення потоків плазми повинні дотримуватися певні умови. Значення граничних струмів, при яких виникають плазмові потоки, залежать від властивостей контактного матеріалу і дугогасного середовища. Так, в елегазі викид потоків плазми на електродах з латуні спостерігається при значно великих значеннях струму (зверху 200А), чим на мідних електродах (на них потоки плазми утворюються при струмі близько 80 А).

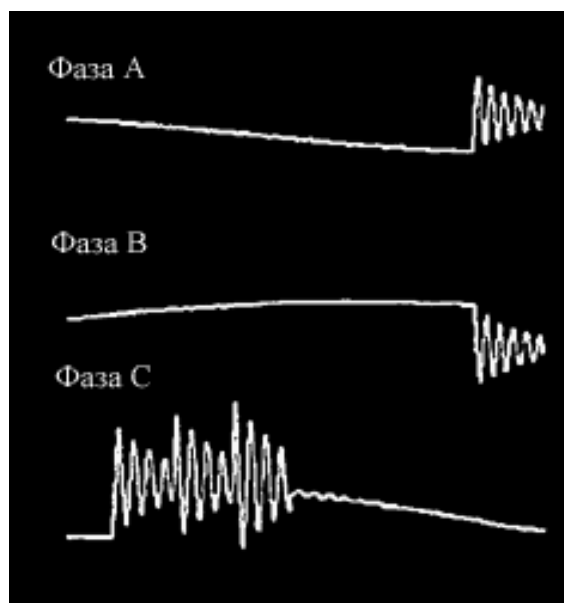


Рисунок 11 - Перенапруження при відключенні двигуна елегазовим вимикачем (Розмірність та ж, що і на мал.4)

Потоки плазми мають вищу температуру, ніж області стовбура дуги, що оточують їх, і вищу електричну провідність. Володіючи високою швидкістю, що досягає 10^3 - 10^4 м/с, потоки плазми насичають проміжок парами металу, знижуючи міцність міжконтактного проміжку, що тим самим відновлюється, що створює умови для повторного пробоя міжелектродного простору.

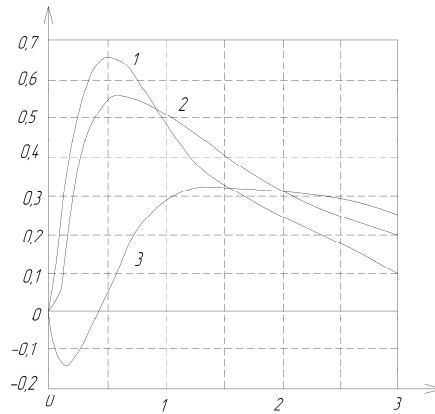


Рисунок 12 - Перенапруги між витками при відключенні двигуна елегазовим вимикачем

Експерименти показують, що в міжконтактному проміжку виникає до 6% пари міді. На мал.10 показані криві залежності пробивної напруги від часу після проходження струму через нуль при різному об'ємі міді: 1 - 6%; 2 - 4%; 3 - 2%. На мал.11 показані результати моделювання при відключенні двигуна елегазовим вимикачем. Видно, що перший пік перенапруження має допустиму кратність. Проте подальші пробіи міжконтактного проміжку елегазового вимикача приводять до збільшення перенапружень до кратності вище допустимою. Неприпустимими виявляються і перенапруження між витками обмотки (мал.12).

Відновлення ізоляційних властивостей елегазового дугогасного середовища відбувається значно швидше, ніж у масляних вимикачів, так як відсутні зважені частинки міді і, як правило, при включенні вірогідність виникнення перенапруження невелика.

2.3 Вакуумні вимикачі

Перенапруження в умовах застосування вакуумних вимикачів визначаються процесами у вакуумних камерах і перш за все емісією струму з поверхні контактної системи. Як правило, поверхню контактів має велике число мікронерівностей і вони прилягають один до одного не всією площиною, а декількома крапками. У перші миті розбіжності контактів точки зіткнення електродів зберігаються, але при цьому площа контактів стрімко зменшується. Також стрімко піднімається температура місць зіткнення, причому до моменту відриву поверхонь один від одного метал переходить в рідкий стан і між контактами, що розходяться, виникають містки з розплавленого металу.

Подальша розбіжність контакту супроводжується стисненням перетину містків, збільшенням температури і тиску. Стартовий етап закінчується вибухом містка і переходом до розряду в парах металу. У цих умовах струм визначається процесами в плазмі.

Хоч і незначний, але є струм, пов'язаний з фотоефектом. Фотоефект, тобто емісія електронів з катода під дією світлового або іншого випромінювання, відбувається при енергії фотона, більшої ефективної роботи виходу $h\nu > W_a$. У свою чергу робота виходу з електроду залежить як від матеріалу, так і від стану поверхні катода, тому щільність струму також залежить від цих чинників. При цьому потрібно мати на увазі, що вірогідність емісії електрона під дією фотона з енергією, більшою W_a , багато менше одиниці. Цю вірогідність називають квантовим виходом. Щільність фотоструму залежить не тільки від енергії фотона, але і від температури і стану поверхні катода. Другий по щільності струм автоелектронної емісії. Автоелектронна емісія з металу у вакуум спостерігається при напруженостях електричного поля на поверхні $E=10^8 \dots 10^9$ В/м.

Сильне електричне поле у катода може виникнути не тільки унаслідок зростання напруженості між електродами, але і унаслідок утворення позитивного об'ємного заряду

поблизу катода. Поверхня катода зазвичай буває нерівною і неоднорідною на окремих ділянках, і помітний струм автоелектронної емісії може виникнути вже при середній напруженості порядку 10^7 В/м.

З урахуванням збільшення прозорості бар'єру спрощена формула, зручна при практичних розрахунках щільності струму автоелектронної емісії при $T=0\text{K}$, має вигляд:

$$j = AE^2 \exp(-BW_a^{3/2}/E), \quad (3.2)$$

де E - напруженість електричного поля у В/см;

W_a - робота виходу з металу в еВ;

$j_A(0)$ в А/см².

Підвищення температури катода приводить до зростання щільності автоелектронної емісії $j_A(T)$, оскільки частина електронів матиме енергію, велику W_{Fe} .

Емісія електронів може відбуватися при бомбардуванні катода повільними (потенційна іонноелектронна емісія) або швидкими, такими, що мають енергію декілька килоелектрон вольт (кінетична іонноелектронна емісія), позитивними іонами.

При зближенні позитивного іона з металом ширина потенційного бар'єру зменшується настільки, що стає можливим тунелювання електрона на вільний нормальний енергетичний рівень позитивного іона. В результаті цього утворюється нейтральна частинка.

При нейтралізації виділяється енергія, рівна різниці енергій, необхідній для іонізації частинки W_u енергії, яку мав електрон в металі, w_x . Емісія електрона у вакуум можлива, якщо енергія, що виділилася, буде більше роботи виходу: $W_u - w_x > W_a$ або $W_u > W_a + w_x$. Оскільки $w_x > W_a$, емісія електрона має місце лише при виконанні умови $W_u > 2W_a$.

Стовбур розряду на стартових етапах має дуже високу провідність, яка значно більше, чим провідність у елегазових і масляних вимикачів, що в сукупності з конструктивними вирішеннями контактної системи забезпечує перенапруження, що не перевищують допустимі. Проте після проходження струму через нуль виникають багатократні пробої, які можуть за певних умов привести до ескалації перенапружень.

При фіксованій швидкості відновлення діелектричної міцності умови для першого і подальших пробоев залежать від моменту початку руху контактів $t_{відкл}$, відлічуваного від моменту переривання струму. При відключенні пускового струму при $di/dt = 50$ А/мксек, $t_{відкл} = 0,17$ мсек, після зрізу струму при його миттєвому значенні $i = 5$ А, міцність проміжку ВВ через час $t_{відкл} = 0,17$ мсек після початку руху контактів виявляється недостатньою. Відбувається перший, а потім ряд подальших пробоев проміжку з гасінням дуги кожного разу після проходження через вимикач один трьох (залежно від швидкості підходу струму до нуля) високочастотних півхвиль струму.

Найважливішим явищем, що впливає на можливість виникнення перенапружень в умовах, коли контакти холодні, є вибухова автоелектронна емісія. Це відбувається, як правило, при включенні після тривалої перерви. У цих умовах по суті відсутні, принаймні, на першому етапі руху контактів, складові термоелектронної і фотоелектронної емісій. Розряд виникає з мікронерівностей контактної системи. Через деякий час затримки t_3 після початку емісії відбуваються мікробибухи вістрів на катоді, при цьому утворюються плазмові згустки - катодні факели, що розширюються із швидкістю порядку 10^4 м/с, а щільність струму швидко наростає.

Із зростанням напруженості електричного поля t_3 зменшується обернено пропорційно до квадрата щільності струму:

$$t_3 = 4 \cdot 10^9 / j_A^2, \quad (3.3)$$

де j_A в А/см², t_3 в сек.

Швидке зростання щільності струму обумовлене термоелектронною емісією з плазмового катодного факела. Ще до досягнення катодним факелом анода назустріч

ньому починає рухатися анодний факел, що утворюється в результаті бомбардування анода прискореними електронами.

Тривалість імпульсу струму вибухової емісії t_{ee} визначається в основному часом перекриття проміжку катодним факелом:

$$t_{ee} = d/v, \quad (3.4)$$

де d - відстань між електродами;

v - швидкість розподілу катодного факела.

Проте перші пробої при сходженні контактів відбуваються на дуже близькій відстані між ними, що робить вірогідність ескалації перенапружень дуже низької.

Таким чином, приведені вище дані показують, що перенапруження, через специфічні процеси в дугогасних системах, виникають в умовах застосування вимикачів з будь-якими дугогасними системами. Проте вірогідність перенапружень і їх величина залежать не тільки від процесів в дугогасній системі, але і від параметрів мережі.

Отже зробимо висновки по даній главі. Основними причинами перенапружень наїзоляції окремого приєднання при відключенні навантаження, пов'язаними з особливостями дугогасного середовища і конструкцією вимикача, є зріз струму і ескалація напруги.

Зріз струму характерний для вимикачів будь-якого типу, що застосовується в даний час. При зрізі струму в індуктивності навантаження «закривається» енергія, яка потім звільняється на ємкість приєднання і може викликати перенапруження.

На перенапруження при зрізі впливають: величина струму зрізу, індуктивність навантаження (або потужність) і ємкість приєднання (довжина повітряної або кабельної лінії).

Явище ескалації напруги характерне тільки для вакуумних вимикачів і виникає у край рідко, тільки при відключенні пускового струму електродвигунів що не встигли розвернутися або загальмованих електродвигунів.

Вплив дугогасного середовища (масло, елегаз, вакуум) на характер протікання розряду вельми істотно, оскільки зумовлює такі основні характеристики дуги, як її діаметр, температуру, час горіння, викид потоків плазми і ін.

В процесі розкладання масла утворюються водень, висока теплопровідна здатність якого забезпечує ефективне гасіння дуги. А також утворюються вуглецеві з'єднання у вигляді твердого осаду, які до декількох місяців залишаються в маслі в підвішаному (зваженому) стані, знижуючи електричну міцність масла, що погано позначається на процесах в дугогасній камері в режимі включення. А при зменшенні відстані між контактами виникає передчасний множинний пробій міжконтактного проміжку, що провокує перенапруження.

Елегаз з температурою дисоціації 2000 К володіє високою дугогасною здатністю в порівнянні з повітрям (температура дисоціації 7000 К), оскільки чим нижче температура дисоціації газу, тим краще умови для зменшення залишкової провідності стовбура дуги, оскільки у цьому випадку відбувається інтенсивніше охолодження її високотемпературного ядра. Так само елегаз володіє електронегативними властивостями, що сприяє активному захопленню вільних електронів і підвищенню гасіння дуги. Відновлення ізоляційних властивостей елегазової дугогасного середовища відбувається значно швидше, ніж у масляних вимикачів, так як відсутні зважені частинки міді і, як правило, при включенні вірогідність виникнення перенапруження невелика.

Перенапруження в умовах застосування вакуумних вимикачів визначаються процесами у вакуумних камерах і перш за все емісією струму з поверхні контактної системи. Стовбур розряду на стартових етапах має дуже високу провідність, яка значно більше, чим провідність у елегазових і масляних вимикачів, що в сукупності з

конструктивними вирішеннями контактної системи забезпечує перенапруження, що не перевищують допустимі. Проте після проходження струму через нуль виникають багатократні пробої, які можуть за певних умов привести до ескалації перенапружень. Найважливішим явищем, що впливає на можливість виникнення перенапружень в умовах, коли контакти холодні, є вибухова автоелектронна емісія. Це відбувається, як правило, при включенні після тривалої перерви.

Таким чином, приведені вище дані показують, що перенапруження, через специфічні процеси в дугогасних системах, виникають в умовах застосування вимикачів з будь-якими дугогасними системами. Проте вірогідність перенапружень і їх величина залежать не тільки від процесів в дугогасній системі, але і від параметрів мережі.

Головною частиною в дугогасній камері є контакти. Вони складаються із різних сплавів (в основному міді і хрому) і набувають спеціальної геометрії в окремому приміщенні за допомогою сухої обробки. Контакти виготовляються автоматизованими механізмами в чистих приміщеннях. Стан поверхні контактів має значний вплив на подальшу стійкість напруги дугогасної камери. Виникнення електричної дуги обумовлює появу дефектів контактної системи в дугогасній камері.

Список літератури

1. Чунихин А. А. Электрические аппараты: Учеб. пособие. – М.: Энергия, 1967. – 536 с.
2. Электрическая часть станций и подстанций: Учеб. для вузов/А. А. Васильев, И. П. Крючков, Е. Ф. Наяшкова и др., Под ред. А. А. Васильева – М.: Энергоатомиздат, 1990.
3. Рожкова Л. Д., Козулин В.С. Электророборудование станций и подстанций: Учебник для техникумов. – М.: Энергоатомиздат, 1987.
4. Борисов В.В. Особенности дуговых процессов в выключателях 6-35 кВ с различными дугогасящими средами// Методы и средства оценки состояния энергетического оборудования. Вып. 7. - 1998. - С. 59-67.
5. Эксплуатация электрических аппаратов/ Г.Н. Александров, А.И. Афанасьев, В.В. Борисов и др ; Под ред. Г.Н. Александрова. - СПб.: Изд. ПЭИПК, 2000. - 307 с.: ил.
6. Защита сетей 6-35 кВ от перенапряжений/ Ф.Х. Халилов, Г.А. Евдокунин, В.С. Поляков и др.; Под ред. Ф.Х. Халилова, Г.А. Евдокунина, А.И. Таджибаева. - СПб.: Энергоатомиздат, Санкт-Петербургское отделение, 2002. - 272 с.: ил.
7. Базуткин В.В., Евдокунин Г.А., Халилов Ф.Х. Ограничение перенапряжений, возникающих при коммутациях индуктивных цепей вакуумными выключателями. - Электричество, 1994, № 2.
8. Руководство по защите электрических сетей 6 -1150 кВ от грозových и коммутационных перенапряжений/ Под научной редакцией Н.Н. Тиходеева. - 2-е изд. - СПб.: Изд. ПЭПК, 2000. - 307 с.: ил.
9. Шлейфман И.Л. Коммутационный ресурс масляных выключателей. - Электрические станции, 1991, №5. - С. 76-78.
10. «Перенапряжения в электрических сетях различного назначения и защита от них», К.П.Кадомская, Ю.А.Лавров и А.А.Рейхердт НГТУ, Новосибирск, 2004.
11. Выключатели вакуумные типа ВВ/TEL-10. Руководство по эксплуатации; «Таврида Электрик», 1996 г.
12. «О снижении взрывоопасности шкафов КРУ(Н) 6 -10 кВ при дуговых К.З.» к.т.н. Зотов А.Я. МП «Энергетик». Москва.
13. Вольпов К.Д., Белый Ю.В. О повреждаемости изоляции электродвигателей собственных нужд электростанций. // Электрические станции. – 1976. – №6. – с.34-35.
14. Сивокобыленко В.Ф., Костенко В.Н. Причины повреждений электродвигателей в пусковых режимах на блочных электростанциях. // Электрические станции. – 1974. – №4. –С.33-35.
15. Евдокунин Г.А., Корепанов А.А. Перенапряжения при коммутации цепей вакуумными выключателями и их ограничение. // Электричество. – 1998. – №4. – С.2-14.
16. Интернет <http://craw.narod.ru> .